Corrigé complet — Bac S 2015 Polynésie rattrapage (ancien programme)

Physique-chimie, enseignement de spécialité **20 points** **3 h 30**

Ex 1	**Le muon, explorateur de volcan** Relativité restreinte · Dilatation des durées · Facteur de Lorentz · Deuxième loi de Newton · Énergie en électronvolts · Ordre de grandeur	6 pts	1 h	9 questions	p. 2
Ex 2	**La vitamine C** Stéréoisomérie · Spectroscopie infrarouge · Groupes caractéristiques · Catalyse et catégories de réactions · Titrage acido-basique · Incertitude de mesure	9 pts	1 h 30	13 questions	p. 6
Ex 3	**Pharao, l'horloge atomique de l'espace** Absorption et émission d'un photon · Dualité onde-particule · Conservation de la quantité de mouvement · Accélération · Effet Doppler · Agitation thermique et température	5 pts	50 min	10 questions	p. 12

Comment s'en servir. Fais d'abord le sujet en temps limité, puis corrige-toi exercice par exercice. À gauche de chaque question, sur les carreaux : ce qu'il faut écrire sur ta copie. À droite : les pièges, ce qu'il faut comprendre et les méthodes.

Le muon, explorateur de volcan

Bac S 2015 Polynésie rattrapage (ancien programme) · Exercice 1 **6 points** **Durée conseillée 1 h**

1.1.1 Retrouver par un calcul la durée du trajet, estimée dans les documents, d'un muon créé à 20 km d'altitude et arrivant au sol.

Données utiles $d = 20$ km ; $c = 299\,792\,458\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$; vitesse du muon proche de c

Le muon se déplace à une vitesse v très proche de la célérité de la lumière : on prend $v \approx c$.

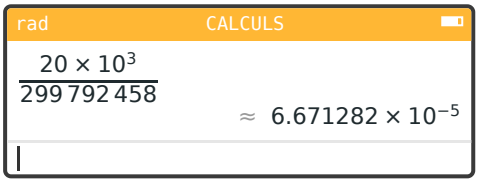
$$\Delta t = \frac{d}{v} \approx \frac{d}{c} = \frac{20 \times 10^3}{299\,792\,458} = 6{,}7 \times 10^{-5}\ \text{s}$$

$\Delta t \approx 67\ \mu\text{s}$: on retrouve la valeur annoncée dans le document.

PIÈGE
Laisser la distance en kilomètres : il faut $d = 20 \times 10^3$ m pour obtenir une durée en secondes.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme la distance de 20 km. Prendre $v = 0{,}9994\,c$ ou $c = 3{,}0 \times 10^8\ \text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ conduit au même résultat arrondi.

À LA CALCULATRICE



1.1.2 Énoncer le postulat d'Einstein relatif à la vitesse de la lumière.

La vitesse de la lumière dans le vide a la même valeur c dans tous les référentiels galiléens.

Elle ne dépend donc ni du mouvement de la source, ni de celui de l'observateur.

PIÈGE
Oublier « dans le vide » ou « référentiels galiléens » : ces deux précisions font partie du postulat.

COMPRENDRE
La relativité restreinte figurait au programme de Terminale S ; elle n'est plus au programme actuel de la spécialité. Cet exercice reste un bon entraînement sur les calculs de durées, d'énergies et d'ordres de grandeur.

1.1.3 Expliquer sans calcul pourquoi la détection de nombreux muons au niveau du sol est une preuve expérimentale de la dilatation des durées.

Dans le référentiel terrestre, le trajet du muon dure environ 67 µs, soit 30 fois sa durée de vie propre ΔT_0 (durée de vie mesurée dans le référentiel où le muon est immobile).

Si la durée de vie du muon était la même dans le référentiel terrestre, presque tous les muons se désintégreraient bien avant d'atteindre le sol.

Or on en détecte un grand nombre au sol. Leur durée de vie mesurée dans le référentiel terrestre est donc bien plus grande que ΔT_0 : $\Delta T = \gamma\,\Delta T_0$ avec $\gamma > 1$, car le muon se déplace à une vitesse proche de c.

Les muons vivent plus longtemps pour un observateur terrestre que dans leur référentiel propre : c'est la dilatation des durées.

MÉTHODE
Toujours préciser le référentiel de chaque durée : la durée propre se mesure dans le référentiel où les deux événements (création et désintégration du muon) ont lieu au même endroit.

1.2 Pourquoi le muon, le proton et l'électron subissent-ils une force magnétique de même intensité à vitesse égale ? Justifier que la différence de courbure montre que la masse du muon est intermédiaire.

Même intensité. D'après les données, l'intensité F de la force magnétique est proportionnelle à la vitesse, à la valeur absolue de la charge et au champ magnétique ; elle ne dépend pas de la masse. Les trois particules ont la même vitesse, sont dans le même champ et portent une charge de même valeur absolue e : F est donc la même pour les trois.

Courbure. Deuxième loi de Newton appliquée à une particule de masse m dans le référentiel du laboratoire supposé galiléen : $\vec{a} = \dfrac{\vec{F}}{m}$.

À force égale, plus la masse est grande, plus l'accélération est faible : la direction du vecteur vitesse change moins vite et la trajectoire est moins incurvée.

La trajectoire du muon est moins incurvée que celle de l'électron et plus incurvée que celle du proton.

$$m_{\text{électron}} < m_{\mu} < m_{\text{proton}}$$

PIÈGE
Dire que la force est plus faible sur le proton parce qu'il est plus lourd. La force est identique ; c'est son effet, l'accélération, qui dépend de la masse.

COMPRENDRE
Pour un mouvement circulaire, $a = \dfrac{v^2}{R}$ donc $R = \dfrac{m\,v^2}{F}$: à v et F égales, le rayon de la trajectoire est proportionnel à la masse.

2.1 Justifier par un calcul que les muons du CERN ont un temps de vie environ égal à 30 fois leur temps de vie au repos.

Données utiles $v = 0{,}9994\,c$; $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1 - \dfrac{v^2}{c^2}}}$; $\Delta T = \gamma\,\Delta T_0$

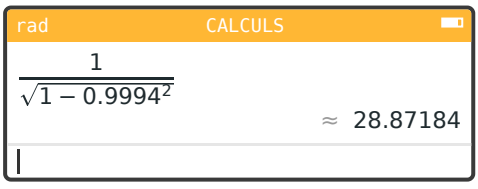
Le temps de vie mesuré dans le laboratoire est $\Delta T = \gamma\,\Delta T_0$, où ΔT_0 est le temps de vie au repos. Il faut donc calculer γ avec $\dfrac{v}{c} = 0{,}9994$:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - 0{,}9994^2}} = 28{,}87$$

$\dfrac{\Delta T}{\Delta T_0} = \gamma \approx 29$, soit environ 30 : l'affirmation est justifiée.

PIÈGE
Oublier le carré ou la racine. Garder aussi tous les chiffres de $0{,}9994$: arrondir à 1 rend le calcul impossible.

À LA CALCULATRICE



2.2 Vérifier la cohérence entre les valeurs « 14 ou 15 tours » et « 400 tours » données dans les documents.

Données utiles $\gamma = 28{,}87$ (2.1)

Selon la mécanique newtonienne, le muon vit une durée ΔT_0 et parcourt 14 ou 15 tours d'anneau.

Dans le laboratoire, il vit en réalité $\Delta T = \gamma\,\Delta T_0$ en gardant la même vitesse : il parcourt donc une distance γ fois plus grande, soit γ fois plus de tours.

$28{,}87 \times 14 = 404$ tours $\qquad$ $28{,}87 \times 15 = 433$ tours

Entre 404 et 433 tours : c'est bien « plus de 400 tours », les deux valeurs sont cohérentes.

MÉTHODE
À vitesse constante, la distance parcourue est proportionnelle à la durée : le nombre de tours est multiplié par le même facteur que la durée de vie.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

28.87×14
≈ 404.18

28.87×15
≈ 433.05

3.1 Expliquer pourquoi un muon ordinaire d'énergie moyenne 4 GeV ne peut pas servir à radiographier la Soufrière.

Données utiles perte moyenne : 2 MeV par cm de roche ; $E = 4$ GeV ; échelle de la carte : 500 m

Épaisseur de roche L au bout de laquelle le muon a perdu toute son énergie, avec $E = 4\ \text{GeV} = 4 \times 10^3$ MeV :

$$L = \frac{4 \times 10^3}{2} = 2 \times 10^3\ \text{cm} = 20\ \text{m}$$

D'après l'échelle de la carte, la Soufrière mesure plusieurs centaines de mètres de large.

Un muon ordinaire est arrêté après environ 20 m de roche : il ne peut pas traverser le volcan, donc il n'atteint pas le télescope.

PIÈGE
Diviser 4 par 2 sans convertir : 1 GeV vaut 10^3 MeV.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\frac{4 \times 10^3}{2}$
≈ 2000

3.2 Déterminer l'ordre de grandeur de l'énergie apportée en une minute par le flux de muons ordinaires sur la surface de la Soufrière, puis la comparer à une énergie de son choix.

Données utiles flux : 1 muon par cm² et par minute ; $E = 4$ GeV par muon ; $1\ \text{eV} = 1{,}60 \times 10^{-19}$ J ; $g = 10\ \text{N} \cdot \text{kg}^{-1}$; carte avec son échelle (500 m)

Diamètre. Sur la carte, le diamètre du disque grisé vaut environ deux fois la longueur du segment de 500 m : $D \approx 1 \times 10^3\ \text{m} = 1 \times 10^5$ cm.

Surface. $S = \pi \dfrac{D^2}{4} = \pi \times \dfrac{(1 \times 10^5)^2}{4} \approx 8 \times 10^9\ \text{cm}^2$

Nombre de muons en une minute. Un muon par cm² : $N \approx 8 \times 10^9$ muons.

Énergie. $E_{\text{tot}} = N \times E = 8 \times 10^9 \times 4 \times 10^9 \times 1{,}60 \times 10^{-19} \approx 5$ J

Comparaison. Soulever une masse de 500 g d'une hauteur de 1 m demande $m\,g\,h = 0{,}500 \times 10 \times 1 = 5$ J.

$E_{\text{tot}} \approx 5$ J, soit quelques joules : l'énergie nécessaire pour soulever un objet de 500 g d'un mètre.

PIÈGE
Calculer S en m² alors que le flux est donné par cm². Penser aussi à convertir les GeV en eV ($\times 10^9$) avant de passer en joules.

COMPRENDRE
Une mesure plus fine à la règle donne D entre 900 m et 1 km ; l'ordre de grandeur ne change pas. L'énergie reçue par tout le volcan est minuscule, alors que chaque muon est très énergétique à l'échelle d'une particule.

À LA CALCULATRICE

rad CALCULS

$\frac{\pi \times (1 \times 10^5)^2}{4}$
$\approx 7.853982 \times 10^9$

$8 \times 10^9 \times 4 \times 10^9 \times 1.60 \times 10^{-19}$
≈ 5.12

$0.500 \times 10 \times 1$
≈ 5

3.3 Déterminer le rapport v/c pour un muon ordinaire d'énergie 4 GeV. En déduire pourquoi les muons utilisés en radiographie volcanique sont dits « ultra-relativistes ».

Données utiles $E = \gamma\, m\, c^2$; $m_\mu = 105{,}66\ \text{MeV}\cdot c^{-2}$; $E = 4\ \text{GeV} = 4\times10^3\ \text{MeV}$

Avec $m_\mu c^2 = 105{,}66$ MeV : $\gamma = \dfrac{E}{m_\mu c^2} = \dfrac{4\times10^3}{105{,}66} = 37{,}86$

Or $\gamma = \dfrac{1}{\sqrt{1-\dfrac{v^2}{c^2}}}$, donc $1-\dfrac{v^2}{c^2} = \dfrac{1}{\gamma^2}$ et

$$\frac{v}{c} = \sqrt{1-\frac{1}{\gamma^2}} = \sqrt{1-\frac{1}{37{,}86^2}} = 0{,}99965$$

Un muon ordinaire va déjà à 99,965 % de la célérité de la lumière. Les muons utilisés pour la radiographie ont une énergie supérieure à 1000 GeV : leur facteur γ est au moins 250 fois plus grand, et leur vitesse encore plus proche de c.

$\dfrac{v}{c} = 0{,}99965$; les muons de radiographie, de vitesse quasiment égale à c, sont « ultra-relativistes ».

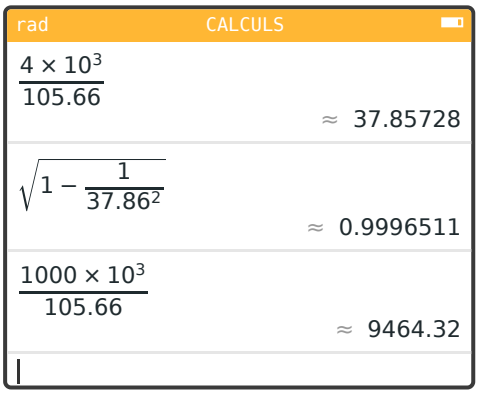
PIÈGE

Le rapport v/c doit rester inférieur à 1. Garder assez de chiffres : arrondi à $1{,}00$, le résultat ne veut plus rien dire.

COMPRENDRE

Pour $E = 1000$ GeV, $\gamma \approx 9{,}5\times10^3$: l'écart entre v et c n'apparaît qu'à la neuvième décimale de v/c. La mécanique de Newton ne s'applique plus du tout.

À LA CALCULATRICE



La vitamine C

Bac S 2015 Polynésie rattrapage (ancien programme) · Exercice 2 **9 points** **Durée conseillée 1 h 30**

1.1.1 Recopier la formule de l'acide L-ascorbique, repérer par un astérisque le ou les carbones asymétriques et justifier la chiralité de la molécule.

Un carbone asymétrique est un carbone tétraédrique lié à quatre atomes ou groupes d'atomes tous différents.

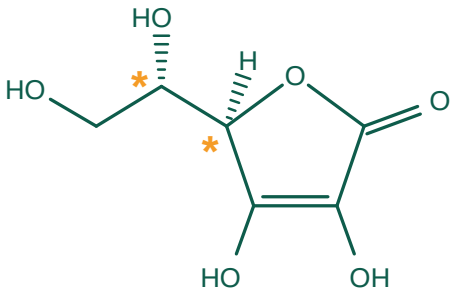
La molécule en compte deux (voir la formule) : le carbone du cycle qui porte l'atome H, et le carbone de la chaîne latérale qui porte un groupe OH.

Les carbones de la double liaison $C{=}C$ et celui du groupe $C{=}O$ ne sont pas tétraédriques ; le carbone du groupe CH_2OH porte deux H identiques.

Deux carbones asymétriques. La molécule est chirale : elle diffère de son image dans un miroir plan, les deux ne sont pas superposables.

PIÈGE
Deux carbones asymétriques ne garantissent pas la chiralité (une molécule peut posséder un plan de symétrie). L'argument attendu est la non-superposition à l'image dans un miroir, pas le simple décompte des C*.

COMPRENDRE
La chiralité, le carbone asymétrique et les énantiomères faisaient partie du programme de Terminale S. Ces notions ne figurent plus au programme actuel de la spécialité.



* : carbone asymétrique

1.1.1 · Acide L-ascorbique : les deux carbones asymétriques

1.1.2 Représenter l'énantiomère de l'acide L-ascorbique. La molécule possède-t-elle d'autres stéréoisomères ? Combien ? Quelle relation les lie à l'acide L-ascorbique ?

L'énantiomère est l'image de la molécule dans un miroir plan (voir la figure) : la configuration des deux carbones asymétriques est inversée.

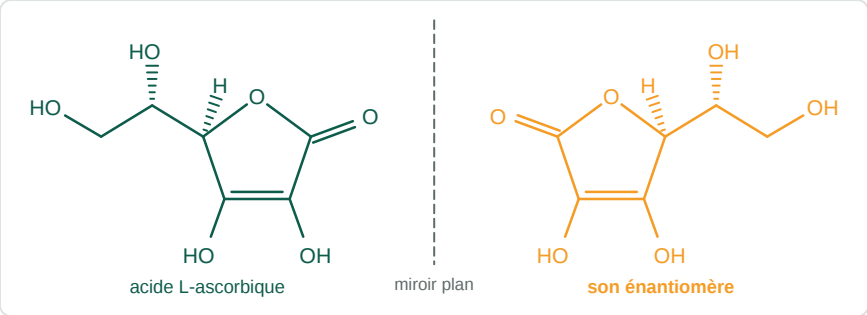
Avec deux carbones asymétriques, il existe $2^2 = 4$ stéréoisomères de configuration : l'acide L-ascorbique, son énantiomère et deux autres molécules, obtenues en inversant la configuration d'un seul des deux carbones asymétriques.

Aucune de ces deux molécules n'est l'image, dans un miroir, de l'acide L-ascorbique.

Oui : deux autres stéréoisomères, qui sont des **diastéréoisomères** de l'acide L-ascorbique.

COMPRENDRE
Les deux diastéréoisomères sont énantiomères l'un de l'autre. La double liaison du cycle ne crée aucune isomérie Z/E : un cycle à cinq atomes impose sa géométrie.

MÉTHODE
Pour dessiner un énantiomère, deux tracés équivalents : l'image dans un miroir placé à côté de la molécule, ou le même squelette en transformant chaque liaison en pointillés en liaison en trait plein épais.



1.1.2 · L'acide L-ascorbique et son image dans un miroir

1.2.1 Vérifier que le domaine de longueurs d'onde du spectre se situe bien dans l'infrarouge.

Données utiles axe du spectre : nombre d'onde σ de 400 à $4000\ \text{cm}^{-1}$

Nombre d'onde et longueur d'onde sont inverses l'un de l'autre : $\sigma = \dfrac{1}{\lambda}$, donc $\lambda = \dfrac{1}{\sigma}$.

$\lambda_{\text{min}} = \dfrac{1}{4000} = 2{,}5 \times 10^{-4}\ \text{cm} = 2{,}5\ \mu\text{m}$

$\lambda_{\text{max}} = \dfrac{1}{400} = 2{,}5 \times 10^{-3}\ \text{cm} = 25\ \mu\text{m}$

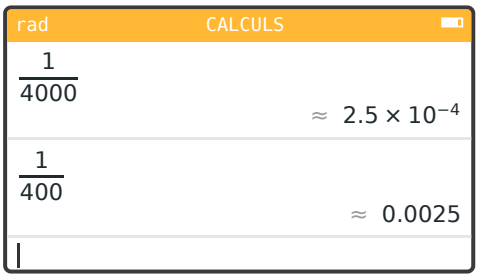
Le domaine visible s'arrête vers $800\ \text{nm} = 0{,}8\ \mu\text{m}$; l'infrarouge correspond aux longueurs d'onde plus grandes.

$2{,}5\ \mu\text{m} \leqslant \lambda \leqslant 25\ \mu\text{m}$: toutes ces longueurs d'onde dépassent $0{,}8\ \mu\text{m}$, le spectre est bien dans l'infrarouge.

PIÈGE
Avec σ en cm^{-1}, le calcul donne λ en centimètres, pas en mètres. Et le plus grand nombre d'onde correspond à la plus petite longueur d'onde.

COMPRENDRE
Les bornes 400 et $4000\ \text{cm}^{-1}$ sont des graduations lues sur l'axe : deux chiffres significatifs suffisent pour une vérification d'ordre de grandeur.

À LA CALCULATRICE



1.2.2 Identifier sur le spectre deux bandes d'absorption caractéristiques de l'acide L-ascorbique. Le spectre IR permet-il de le distinguer des autres stéréoisomères ?

Données utiles O–H : 3200 - 3600 cm^{-1} ; C–H : 2800 - 3100 cm^{-1} ; C=O : 1650 - 1750 cm^{-1}

- Bandes entre 3200 et $3550\ \text{cm}^{-1}$ environ : liaisons O–H des quatre groupes hydroxyle.
- Bande intense vers $1670\ \text{cm}^{-1}$: liaison C=O du cycle.

On observe aussi une bande très intense vers $2900\ \text{cm}^{-1}$, attribuée aux liaisons C–H, mais elle est présente dans presque toutes les molécules organiques.

Les stéréoisomères ont le même enchaînement d'atomes, donc exactement les mêmes liaisons : leurs spectres présentent les mêmes bandes caractéristiques.

Bandes O–H (3200 - 3550 cm^{-1}) et C=O (vers $1670\ \text{cm}^{-1}$). Le spectre IR ne permet pas de distinguer les stéréoisomères.

PIÈGE
Citer la liaison sans donner le nombre d'onde lu sur le spectre, ou choisir C–H comme bande « caractéristique » alors qu'elle n'apprend rien sur les groupes de la molécule.

MÉTHODE
Lire un spectre IR : repérer chaque creux de transmittance au-dessus de $1500\ \text{cm}^{-1}$, relever son nombre d'onde, puis l'associer à une liaison de la table qui existe réellement dans la molécule.

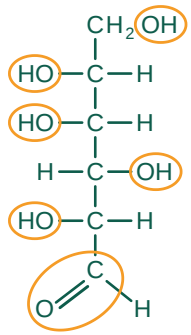
2.1.1 Recopier la formule du D-glucose, identifier ses groupes caractéristiques et nommer les familles de fonctions correspondantes.

La molécule porte (voir la formule) :

- cinq groupes hydroxyle $-\mathrm{OH}$, chacun lié à un carbone tétraédrique : famille des **alcools** ;
- un groupe carbonyle $\mathrm{C{=}O}$ situé en bout de chaîne, le carbone portant aussi un atome H : famille des **aldéhydes**.

Hydroxyle (alcool, cinq fois) et carbonyle en bout de chaîne (aldéhyde).

PIÈGE
Confondre le nom du groupe (hydroxyle, carbonyle) et celui de la famille (alcool, aldéhyde) : la question demande les deux. Un carbonyle en milieu de chaîne correspondrait à une cétone.



5 groupes hydroxyle –OH
famille des alcools

1 groupe carbonyle C=O en bout de chaîne
famille des aldéhydes

2.1.1 · D-glucose : groupes caractéristiques

2.1.2 Quel est l'intérêt du nickel de Raney dans l'étape (a) ? Que signifie l'expression « catalyse hétérogène » ?

Le nickel de Raney est un catalyseur : il accélère l'hydrogénation, donc réduit la durée de l'étape (a), sans figurer dans l'équation de la réaction ; il est régénéré en fin de transformation.

La catalyse est hétérogène lorsque le catalyseur et les réactifs ne sont pas dans la même phase : ici le nickel est un solide (poudre), le glucose est en solution et le dihydrogène est gazeux.

Le nickel augmente la vitesse de la réaction ; « hétérogène » : catalyseur et réactifs dans des phases différentes.

COMPRENDRE
Un catalyseur ne modifie pas l'état final : il permet de l'atteindre plus vite. Sous forme de poudre fine, il offre une grande surface de contact avec les réactifs, ce qui le rend plus efficace.

2.1.3 Quel type de modification a lieu au cours de l'étape (a) ? Quelle est la catégorie de la réaction ?

La chaîne carbonée reste la même (six carbones, non ramifiée) ; seul le groupe carbonyle de l'aldéhyde est transformé en groupe hydroxyle : c'est une modification de groupe caractéristique.

Deux réactifs, $\mathrm{C_6H_{12}O_6}$ et $\mathrm{H_2}$, donnent un seul produit, $\mathrm{C_6H_{14}O_6}$: les atomes d'hydrogène se fixent sur la double liaison $\mathrm{C{=}O}$, qui devient simple.

Modification de groupe caractéristique (aldéhyde $\rightarrow$ alcool) par une réaction d'**addition**.

MÉTHODE
Catégorie d'une réaction : addition si des atomes se fixent sur une liaison multiple (un seul produit) ; élimination si une liaison multiple se forme avec départ d'atomes ; substitution si un atome ou un groupe en remplace un autre.

2.2.1 Recopier la formule du D-sorbitol et identifier un site donneur de doublets d'électrons concerné par la réaction de l'étape (b).

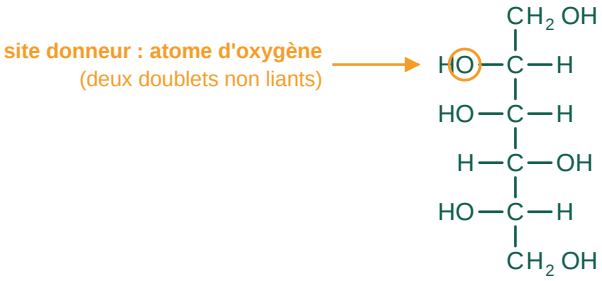
Données utiles électronégativités : H 2,2 ; C 2,5 ; O 3,5

En comparant le D-sorbitol et le L-sorbose, seul le deuxième carbone de la chaîne (en partant du haut) est modifié : son groupe $CH-OH$ devient $C=O$.

L'atome d'oxygène de ce groupe hydroxyle porte deux doublets non liants. Plus électronégatif que C et H ($3{,}5$ contre $2{,}5$ et $2{,}2$), il porte aussi une charge partielle négative δ^- : c'est un site riche en électrons.

Site donneur : l'atome d'oxygène du groupe hydroxyle porté par le deuxième carbone.

COMPRENDRE
Un site donneur est riche en électrons : doublet non liant, liaison multiple ou atome chargé δ^-. Un site accepteur est au contraire appauvri en électrons : atome chargé δ^+ ou cation.



2.2.1 · D-sorbitol : site donneur concerné par l'étape (b)

2.2.2 À quelle catégorie de réaction correspond l'étape (b) ? Justifier.

Le D-sorbitol $C_6H_{14}O_6$ donne le L-sorbose $C_6H_{12}O_6$: la molécule perd deux atomes d'hydrogène (notés « $-2[H]$ » sur le schéma), l'un porté par le carbone, l'autre par l'oxygène voisin, et une double liaison $C=O$ apparaît entre ces deux atomes.

Aucun atome ne vient remplacer ceux qui partent.

C'est une réaction d'**élimination** : départ de deux atomes portés par des atomes voisins et formation d'une liaison double.

COMPRENDRE
Le texte qualifie cette étape d'oxydation : cela décrit le transfert d'électrons (l'alcool est oxydé en cétone). La « catégorie » demandée concerne, elle, le bilan sur la structure : addition, élimination ou substitution.

2.2.3 Quelle relation lie le D-glucose et le L-sorbose ?

Les deux molécules ont la même formule brute $C_6H_{12}O_6$, mais leurs atomes ne sont pas enchaînés de la même façon : le groupe carbonyle est en bout de chaîne dans le D-glucose (aldéhyde) et sur le deuxième carbone dans le L-sorbose (cétone).

Le D-glucose et le L-sorbose sont des **isomères de constitution**.

PIÈGE
Répondre « stéréoisomères » à cause des lettres D et L. Des stéréoisomères ont la même formule semi-développée ; ici les groupes caractéristiques diffèrent, donc l'enchaînement des atomes aussi.

3.1 Proposer une méthode permettant de repérer visuellement l'équivalence du titrage, en argumentant à l'aide des données.

Données utiles vert de bromocrésol : $3{,}8$ - $5{,}4$; BBT : $6{,}0$ - $7{,}6$; phénolphtaléine : $8{,}2$ - 10

On ajoute quelques gouttes d'un indicateur coloré dans l'erlenmeyer : l'équivalence est repérée par son changement de teinte. L'indicateur convient si sa zone de virage se situe dans le saut de pH, autour du pH à l'équivalence.

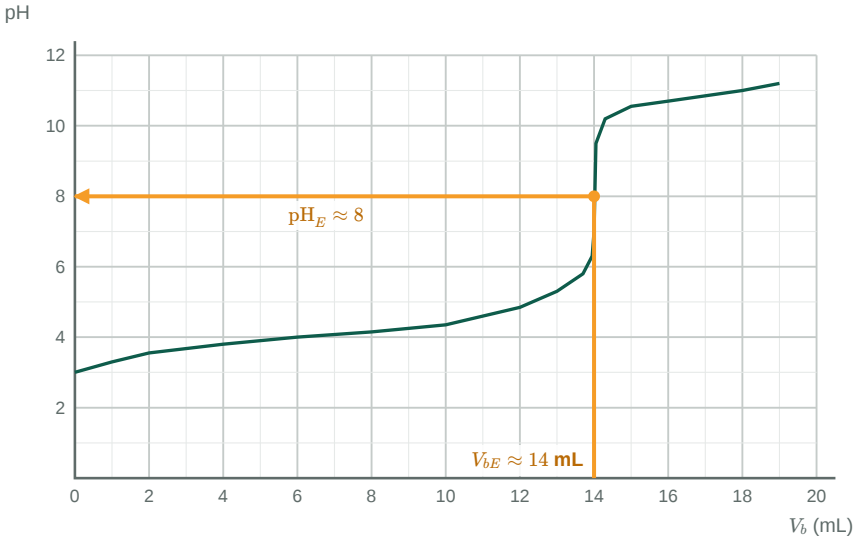
Sur la courbe, le saut, quasi vertical, s'étend de pH ≈ 6 à pH ≈ 10 pour $V_b \approx 14$ mL ; son milieu donne $\text{pH}_E \approx 8$.

- Vert de bromocrésol : il vire entre $3{,}8$ et $5{,}4$, bien avant l'équivalence. Il ne convient pas.
- BBT : sa zone de virage s'achève à $7{,}6$ et commence à $6{,}0$, au pied du saut : le changement de teinte débute un peu trop tôt.
- Phénolphtaléine : sa zone $(8{,}2$ - $10)$ est entièrement située dans la partie verticale du saut, tout près de pH_E.

On utilise la phénolphtaléine : l'équivalence est atteinte quand la solution passe de l'incolore au rose persistant, à la goutte près.

PIÈGE
Verser beaucoup d'indicateur : c'est lui-même un acide ou une base, qui consomme du réactif titrant. Quelques gouttes suffisent.

COMPRENDRE
Aucune zone de virage ne contient strictement $\text{pH}_E \approx 8$. Le BBT, dont la zone s'arrête à $7{,}6$, donnerait un volume très proche (passage du jaune au bleu) : ce choix, bien argumenté, est aussi recevable.



3.1 · Courbe du sujet : lecture du pH à l'équivalence, au milieu du saut

3.2 Les résultats expérimentaux sont-ils en accord avec l'indication du fabricant ? Argumenter à l'aide d'un encadrement du volume versé à l'équivalence.

Données utiles $C_b = 2{,}00 \times 10^{-1}\ \text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$; $M = 176\ \text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$; huit valeurs de V_{bE} ; $\Delta X = 2\,\dfrac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$; indication : 500 mg

Encadrement du volume. Avec les $n = 8$ valeurs (mode statistique de la calculatrice) : $\overline{V_{bE}} = 14{,}125$ mL et $\sigma_{n-1} = 0{,}167$ mL.

$$\Delta V_{bE} = 2 \times \frac{0{,}167}{\sqrt{8}} = 0{,}12\ \text{mL}$$

Les volumes sont lus à 0,1 mL près : on garde un seul chiffre pour l'incertitude, arrondie par excès, soit $\Delta V_{bE} = 0{,}2$ mL.

$V_{bE} = (14{,}1 \pm 0{,}2)$ mL, c'est-à-dire $13{,}9\ \text{mL} \leqslant V_{bE} \leqslant 14{,}3\ \text{mL}$ (niveau de confiance 95 %).

Masse d'acide ascorbique. À l'équivalence, les réactifs ont été introduits dans les proportions stœchiométriques (une mole pour une mole) : $n(\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6) = n(\text{HO}^-)_{\text{versé}} = C_b\,V_{bE}$.

$$m = C_b\,V_{bE}\,M$$

$m_{\text{min}} = 2{,}00 \times 10^{-1} \times 13{,}9 \times 10^{-3} \times 176 = 0{,}489$ g

$m_{\text{max}} = 2{,}00 \times 10^{-1} \times 14{,}3 \times 10^{-3} \times 176 = 0{,}503$ g

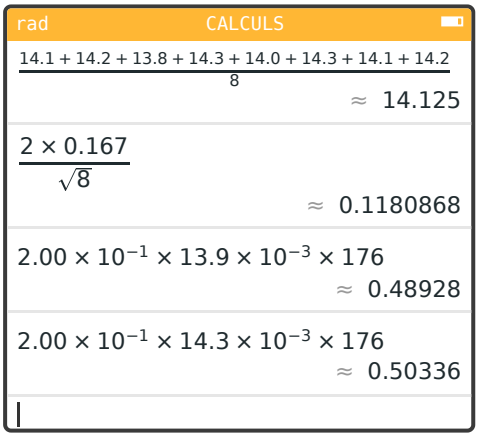
$489\ \text{mg} \leqslant m \leqslant 503\ \text{mg}$: la valeur annoncée, 500 mg, appartient à cet intervalle. Les résultats sont en accord avec l'indication du fabricant.

PIÈGE
Prendre σ_n au lieu de σ_{n-1} sur la calculatrice, oublier la division par $\sqrt{n}$, ou laisser les volumes en millilitres dans le calcul de la masse.

COMPRENDRE
En gardant deux chiffres, $\Delta V_{bE} = 0{,}12$ mL, on obtient $493\ \text{mg} \leqslant m \leqslant 502\ \text{mg}$: la conclusion est la même. Une incertitude s'arrondit toujours par excès.

MÉTHODE
Comparer une mesure à une valeur de référence : calculer la moyenne, l'incertitude, écrire l'intervalle, puis regarder si la valeur de référence est dedans. Sans intervalle, « c'est proche » ne vaut pas argument.

À LA CALCULATRICE



3.3 Que pourrait-on envisager pour rendre le résultat de l'analyse plus précis ?

- Augmenter le nombre de titrages : l'incertitude $\Delta V_{bE} = 2\,\dfrac{\sigma_{n-1}}{\sqrt{n}}$ diminue lorsque n augmente.
- Réduire la dispersion des mesures (σ_{n-1}) en repérant mieux l'équivalence : suivi pH-métrique avec la méthode des tangentes ou de la courbe dérivée, plutôt qu'un changement de teinte apprécié à l'œil.
- Utiliser une solution titrante moins concentrée : le volume équivalent, plus grand, est lu sur la burette avec une meilleure précision relative.

Davantage de titrages, un repérage de l'équivalence plus fin (pH-métrie), une solution titrante plus diluée.

COMPRENDRE
L'incertitude varie comme $1/\sqrt{n}$: pour la diviser par deux, il faut quatre fois plus de titrages, soit 32 au lieu de 8.

Pharao, l'horloge atomique de l'espace

Bac S 2015 Polynésie rattrapage (ancien programme) · Exercice 3 **5 points** **Durée conseillée 50 min**

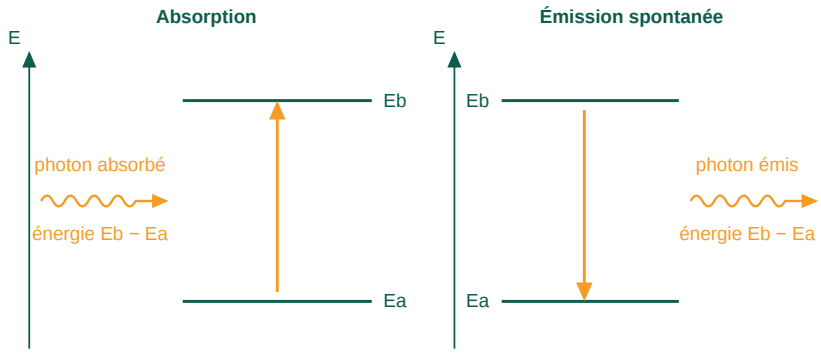
1.1.1 Illustrer à l'aide d'un diagramme de niveaux d'énergie la signification des termes « absorption » et « émission spontanée ».

Absorption : l'atome, dans l'état d'énergie E_a, capte un photon d'énergie $h\nu_0 = E_b - E_a$ et passe dans l'état d'énergie supérieure E_b.

Émission spontanée : l'atome, dans l'état excité E_b, retombe de lui-même dans l'état E_a en émettant un photon d'énergie $h\nu_0 = E_b - E_a$, dans une direction quelconque.

Flèche montante de E_a vers E_b pour l'absorption, flèche descendante de E_b vers E_a pour l'émission spontanée, avec $h\nu_0 = E_b - E_a$ dans les deux cas.

PIÈGE
Inverser le sens des flèches, ou oublier de relier l'énergie du photon à l'écart entre les deux niveaux. L'axe vertical des énergies doit être orienté vers le haut et nommé.



1.1.1 · Diagrammes de niveaux d'énergie : absorption et émission spontanée

1.1.2 Quel autre type d'émission peut-on rencontrer ? Dans quel dispositif est-il utilisé ?

Il existe aussi l'**émission stimulée** : un photon incident d'énergie $E_b - E_a$ provoque la désexcitation d'un atome excité, qui émet un second photon identique au premier (même fréquence, même direction, même phase).

Émission stimulée, utilisée dans le **laser**.

COMPRENDRE
L'émission stimulée et le fonctionnement du laser ne figurent plus au programme actuel de spécialité de Terminale. L'absorption et l'émission d'un photon par un atome, elles, restent à connaître.

1.2 La quantité de mouvement d'un photon de fréquence ν est $p = \dfrac{h\,\nu}{c}$. À quelle particularité de la lumière cette relation fait-elle référence ?

La relation associe une grandeur propre à une particule, la quantité de mouvement p, à une grandeur propre à une onde, la fréquence ν.

Avec $\lambda = \dfrac{c}{\nu}$, elle s'écrit $p = \dfrac{h}{\lambda}$: c'est la relation de de Broglie.

Elle traduit la **dualité onde-particule** de la lumière.

COMPRENDRE
La relation de de Broglie n'est plus au programme actuel de spécialité. Le modèle du photon, d'énergie $E = h\nu$, y figure toujours.

1.3.1 Le système {atome de rubidium + photon} étant isolé, utiliser la conservation de la quantité de mouvement pour retrouver l'expression de la vitesse de recul V et l'ordre de grandeur de sa valeur.

Données utiles $h = 6{,}63 \times 10^{-34}$ J · s ; $m = 1{,}45 \times 10^{-25}$ kg ; $\lambda = 0{,}78$ μm

Référentiel du laboratoire, supposé galiléen. Le système est isolé : sa quantité de mouvement totale se conserve, $\vec{p}_{\text{avant}} = \vec{p}_{\text{après}}$.

Avant l'absorption, l'atome est immobile : seul le photon compte, $p_{\text{avant}} = \dfrac{h\,\nu_0}{c}$.

Après l'absorption, le photon a disparu et l'atome, de masse m, a la vitesse V dans le sens de propagation du photon : $p_{\text{après}} = m\,V$.

En projetant sur la direction du faisceau : $m\,V = \dfrac{h\,\nu_0}{c}$, donc $V = \dfrac{h\,\nu_0}{m\,c}$.

Avec $\nu_0 = \dfrac{c}{\lambda}$: $V = \dfrac{h}{m\,\lambda}$

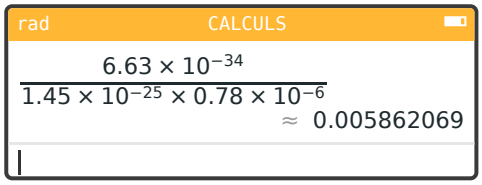
$$V = \frac{6{,}63 \times 10^{-34}}{1{,}45 \times 10^{-25} \times 0{,}78 \times 10^{-6}} = 5{,}9 \times 10^{-3}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$V = \dfrac{h\,\nu_0}{m\,c} = 5{,}9 \times 10^{-3}$ m · s^{-1}, soit environ 6 mm · s^{-1} comme l'annonce le texte.

PIÈGE
Laisser λ en micromètres : il faut $0{,}78 \times 10^{-6}$ m. Ne pas oublier non plus que le photon n'existe plus après l'absorption.

COMPRENDRE
Deux chiffres significatifs, comme λ, la donnée la moins précise. La quantité de mouvement et sa conservation ne sont plus au programme actuel de spécialité.

À LA CALCULATRICE



1.3.2 Définir l'accélération de l'atome et retrouver l'ordre de grandeur de sa valeur, en admettant que la durée de l'absorption est de l'ordre de la période du cycle « absorption-désexcitation ».

Données utiles $V = 5{,}9 \times 10^{-3}$ m · s^{-1} (1.3.1) ; 10^8 cycles par seconde

Le vecteur accélération est la dérivée du vecteur vitesse par rapport au temps : $\vec{a} = \dfrac{\mathrm{d}\vec{v}}{\mathrm{d}t}$. Sa valeur moyenne sur une durée Δt est $a = \dfrac{\Delta v}{\Delta t}$.

L'atome effectue 10^8 cycles par seconde : la période d'un cycle est $T = \dfrac{1}{10^8} = 10^{-8}$ s.

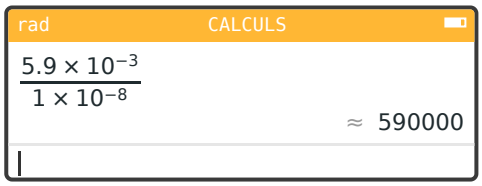
À chaque absorption, de durée $\Delta t \approx T$, la vitesse de l'atome varie de $\Delta v = V$:

$$a = \frac{V}{T} = \frac{5{,}9 \times 10^{-3}}{10^{-8}} = 5{,}9 \times 10^{5}\ \text{m} \cdot \text{s}^{-2}$$

$a \approx 6 \times 10^5$ m · s^{-2}, d'ordre de grandeur 10^6 m · s^{-2} : c'est la valeur du texte.

COMPRENDRE
L'ordre de grandeur est la puissance de dix la plus proche : $5{,}9 \times 10^5$ est plus près de 10^6 que de 10^5.

À LA CALCULATRICE



1.4 Expliquer qualitativement pourquoi l'effet de l'émission spontanée sur la vitesse est en moyenne nul.

Chaque émission spontanée fait reculer l'atome de V, à l'opposé du photon émis. Or ce photon part dans une direction aléatoire, différente d'un cycle à l'autre.

Sur un très grand nombre d'émissions (10^8 par seconde), toutes les directions sont également représentées : les reculs successifs se compensent.

La variation de vitesse due à l'émission spontanée est nulle en moyenne ; seule l'absorption, toujours dans le même sens, agit durablement.

2.1 Expliquer qualitativement le principe physique de l'effet Doppler.

Lorsqu'un émetteur d'ondes et un récepteur sont en mouvement l'un par rapport à l'autre, la fréquence de l'onde reçue diffère de la fréquence de l'onde émise.

La fréquence perçue est plus grande que la fréquence émise si émetteur et récepteur se rapprochent, plus petite s'ils s'éloignent.

PIÈGE
Parler seulement de « changement de fréquence » sans préciser le mouvement relatif de l'émetteur et du récepteur, ni le sens du décalage.

2.2 L'atome 1 se déplace vers le « laser de gauche ». Justifier pourquoi l'effet Doppler permet d'expliquer que cet atome est ralenti.

L'atome 1 se rapproche du laser de gauche : par effet Doppler, il perçoit les photons de ce laser avec une fréquence supérieure à ν. Comme ν est légèrement inférieure à ν_0, la fréquence perçue devient voisine de ν_0 : ces photons sont absorbés.

Chaque absorption communique à l'atome une vitesse de recul dans le sens de propagation du photon, donc vers la droite, à l'opposé de son mouvement.

À l'inverse, l'atome s'éloigne du laser de droite : il perçoit ses photons avec une fréquence encore plus faible que ν, plus éloignée de ν_0, et ne les absorbe presque pas.

L'atome 1 absorbe surtout les photons qui viennent à sa rencontre : sa vitesse diminue.

PIÈGE
Oublier le laser de droite : sans expliquer pourquoi ses photons ne sont pas absorbés, on ne justifie pas que l'atome est freiné plutôt que poussé.

MÉTHODE
Raisonner en trois temps : sens du décalage Doppler, comparaison de la fréquence perçue à ν_0 (absorption ou non), puis sens du recul par rapport à la vitesse.

2.3 Le schéma de la fontaine atomique fait apparaître six flèches représentant chacune un laser. Justifier la position de ces six lasers.

Une paire de lasers de même direction et de sens opposés ralentit les atomes selon une seule direction, quel que soit leur sens de déplacement.

Or l'agitation des atomes se fait dans les trois dimensions de l'espace : il faut une paire de lasers pour chacune des trois directions perpendiculaires.

Trois paires de lasers opposés, suivant trois directions perpendiculaires, soit six lasers qui freinent les atomes dans toutes les directions.

2.4 Expliquer simplement en quoi le système étudié permet effectivement de refroidir des atomes.

La température mesure l'agitation thermique : plus les atomes se déplacent vite, plus elle est élevée.

Les lasers ne chauffent pas les atomes ici : ils réduisent leur vitesse dans toutes les directions.

Diminuer la vitesse des atomes, c'est diminuer leur agitation thermique, donc abaisser la température : les atomes sont refroidis.

COMPRENDRE
À l'échelle microscopique, la température d'un gaz est liée à l'énergie cinétique moyenne de ses atomes. Des atomes presque immobiles correspondent à une température proche du zéro absolu.